



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Offenlegungsschrift

10 DE 198 05 868 A 1

51 Int. Cl.<sup>6</sup>  
B 28 B 1/52

21 Aktenzeichen: 198 05 868.3  
22 Anmeldetag: 13. 2. 98  
43 Offenlegungstag: 28. 10. 99

2

DE 198 05 868 A 1

71 Anmelder:  
DaimlerChrysler AG, 70567 Stuttgart, DE

72 Erfinder:  
Schwarz, Christian, Dipl.-Ing., 89075 Ulm, DE;  
Rebstock, Kolja, Dipl.-Ing., 89073 Ulm, DE; Haug,  
Tilmann, Dr.-Ing., 88690 Uhltingen-Mühlhofen, DE

56 Entgegenhaltungen:  
DE 1 97 11 829 C1  
DE 41 02 909 A1  
DE 39 33 715 A1  
EP 5 64 245 A2

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundwerkstoffs

57 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen eines Faserverbundwerkstoffs mit hochwarmfesten Fasern, insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff, Silizium, Bor und/oder Stickstoff, wobei aus Fasern, Bindemittel und gegebenenfalls Füllstoffen, die in einer Preßform zu einem Grünkörper verpreßt wird. Erfindungsgemäß ist vorgesehen, daß verschiedene Preßmassen hergestellt werden, die Fasern mit unterschiedlicher Qualität und/oder in unterschiedlichen Anteilen enthalten, und die Preßform in mehreren Schritten nacheinander mit den verschiedenen Preßmassen befüllt wird. Die Erfindung betrifft ferner einen derartigen Faserverbundwerkstoff.

DE 198 05 868 A 1

BEST AVAILABLE COPY

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Faserverbundwerkstoffs nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 und einen Faserverbundwerkstoff nach dem Oberbegriff des Anspruchs 16 bzw. 17.

Ein gattungsgemäßes Verfahren sowie ein gattungsgemäßer keramischer Verbundwerkstoff sind in der nicht vorveröffentlichten deutschen Patentanmeldung 1 97 11 829.1 beschrieben. Die daraus bekannten Verstärkungsfasern sind hochwarmfeste Fasern, die in Form von Kurzfaserbündeln vorliegen. Die Faserbündel sind mit einem zur Pyrolyse geeigneten Bindemittel imprägniert. Dazu werden die Faserbündel in das Bindemittel getaucht. Das Bindemittel wird anschließend verfestigt. Damit werden die Faserbündel zusammengehalten und mechanisch verstärkt. Die Faserbündel werden mit weiteren Bindemitteln und Füllmitteln vermischt, und die Mischung wird zu einem CFK-Körper oder "Grünkörper" warm verpreßt, der anschließend unter Vakuum oder Schutzgas zu einem Formkörper mit einer Kohlenstoff-Matrix (C/C-Körper) pyrolysiert wird. Dabei wird auch die Faserbeschichtung umgewandelt, so daß die Faserbündel anschließend mit einer Kohlenstoffschicht überzogen sind. Der Formkörper wird anschließend mit einer Siliziumschmelze infiltriert. Danach liegt ein C/SiC-Faserverbundwerkstoff vor, in dem die Faserbündel in eine Matrix auf SiC-Basis eingebettet sind. Die Kurzfaserbündel sind in der Matrix statistisch verteilt eingebettet, wobei die einzelnen Filamente weitgehend erhalten sind. Die Beschichtung aus Kohlenstoff hat mit dem Matrixwerkstoff reagiert. Dadurch werden die Faserbündel vor dem aggressiven Angriff der Siliziumschmelze geschützt. Diese Faserverbundkeramik zeigt sehr gute tribologische Eigenschaften und ist darüber hinaus relativ preisgünstig und einfach herstellbar. Er ist insbesondere zur Herstellung von Brems scheiben und/oder Bremsbelägen geeignet.

Dieser Werkstoff ist jedoch besonders hohen mechanischen Beanspruchungen, wie sie beispielsweise durch große Fahrzeugmassen oder extreme Geschwindigkeiten auftreten, nicht gewachsen, da er dafür zu spröde und zu wenig schadenstolerant ist.

Es gibt bereits verschiedene Lösungsvorschläge, um dieses Problem zu umgehen. Das deutsche Gebrauchsmuster 296 10 498 beschreibt eine Fahrzeugbrems- bzw. Fahrzeugkupplungsscheibe aus C-C/SiC-Verbundwerkstoff, wobei die Scheibe eine SiC-Beschichtung aufweist. Damit ist der äußere Bereich der Scheibe aus keramischem Material und liefert sehr gute Reibwerte, während der Kern ein Kohlenstoff-Körper ist, der durch seine Quasi-Duktilität eine hohe Schadenstoleranz aufweist. Die Herstellung derartig beschichteter Körper ist jedoch aufwendig und entsprechend teuer. Deswegen finden sie auch nur für besondere Anwendungen, zum Beispiel im Rennsport, Verwendung.

Die europäische Patentanmeldung EP 0 564 245 beschreibt ebenfalls einen mehrschichtigen Werkstoff, der jedoch mit einer Schutzschicht versehen werden muß, um das Eindringen von Silizium in tiefere Bereiche zu verhindern. Auch dies ist ein sehr aufwendiges und teures Verfahren.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, einen Faserverbundwerkstoff der oben genannten Art bereitzustellen, der eine noch höhere Festigkeit und bessere Quasiduktilität des Bauteils bietet. Aufgabe der Erfindung ist ferner, ein Verfahren zu seiner Herstellung bereitzustellen, mit dem der Werkstoff einfach und preisgünstig herstellbar und daher für die Serienproduktion geeignet sind.

Die Lösung besteht in einem Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 bzw. in einem Faserverbundwerkstoff mit den Merkmalen des Anspruchs 16 bzw. 17.

Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich dadurch aus, daß zur Herstellung des Grünkörpers die Presse nacheinander mit den verschiedenen Preßmassen gefüllt wird, wobei die innere Preßmasse aus Fasern schadenstoleranter Kern und die äußerste Preßmasse aus Fasern keramisierte Reibschicht besteht.

Der erfindungsgemäße Werkstoff ist also ein Gradientenwerkstoff, dessen Vorteil in dem sehr einfachen erfindungsgemäßen Herstellungsverfahren liegt.

Erfindungsgemäß ist vorgesehen, bei der Herstellung des Grünkörpers die Preßmassen im Preßwerkzeug beim Befüllen so zu schichten, daß beim späteren Bauteil die hoch verschleißfeste, zu einem großen Teil keramisierte Reibschicht kontinuierlich in einen schadenstoleranten Kern übergeht. Auf diese Weise wird die hohe Verschleißbeständigkeit mit sehr guten mechanischen Kennwerten kombiniert.

Sind also die mechanischen Belastungen für das Bauteil extrem hoch, können Festigkeits- und Dehnungswerte, wie sie zum Beispiel im Dreipunkt-Biegetest nachgewiesen werden können, weiter gesteigert werden. Bei besonders hohen mechanischen Beanspruchungen, wie sie beispielsweise durch hohe Fahrzeugmassen oder extreme Geschwindigkeiten hervorgerufen werden, ist es möglich, daß bekannte Verfahren zur preisgünstigen Herstellung von faserverstärkter Verbundkeramik dahingehend anzupassen, daß der Werkstoff bzw. das Bauteil hohe Festigkeit und sehr gute Verschleißfestigkeit nach außen mit deutlich gesteigert er Quasiduktilität nach innen bietet.

Der Vorteil des erfindungsgemäßen Verfahrens liegt darin, daß keine Notwendigkeit besteht, Schichten mit verschiedenen Eigenschaften durch aufwendige Fügeverfahren zu verbinden. Der Gradient entsteht hier alleine durch die Befüllung. Die einzelnen Schichten weisen durch das Verfahren keine definierten Trennschichten auf.

Die notwendigen Füllhöhen lassen sich je nach Anwendung im Einzelfall aus Versuchen über die Verpreßbarkeit der verschiedenen Preßmassen bei konstantem Druck ermitteln.

Vorteilhafte Weiterbildungen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Eine stark keramisierte Reibschicht auf der Bauteil-, z. B. der Brems scheibenoberfläche erhält man dadurch, daß die in der Preßmasse verarbeiteten Fasern Beschichtungen tragen, die es der Siliziumschmelze ermöglichen, außer kohlenstoffhaltigen Füllstoffen und pyrolysierten Bindern auch Kohlenstoff-Fasern teilweise zu Siliziumcarbid zu konvertieren. Dies gelingt, in dem bekannte Beschichtungen entsprechend dünn aufgetragen werden bzw. reaktivere kohlenstoffhaltige Beschichtungen Verwendung finden.

Die mit einer entsprechenden dünnen Beschichtung versehenen Fasern sind dadurch bei der Verarbeitung zur Preßmasse relativ weich. Sie weisen nach dem Mischen und Pressen einen hohen Verschlingungsgrad auf. Das bedeutet, daß es wenig bis gar keine Zwischenräume gibt, in denen sich beispielsweise Silizium ansammeln kann und somit nach der Infiltration mit flüssigem Silizium als nicht abreagiertes Rest-Silizium zurückbleibt. Die Fasern sind ferner reaktiv an die Matrix gebunden. Daraus folgt ein hoher Anteil an keramischer Faser. Die entstehende Reibschicht weist daher eine hohe Festigkeit mit ausreichender Schadenstoleranz auf und ist gekennzeichnet durch eine hohe Verschleißfestigkeit. Eine mit diesem Verfahren hergestellte Brems scheibe weist z. B. einen hohen Reibwert mit entsprechend abgestimmten Belägen auf.

Auf mindestens einen Teil der verwendeten Verstärkungsfasern wird eine Schicht aus Pyrokohlenstoff (PyC) aufgebracht. Erst dann wird nach dem bekannten Verfahren eine einfache Tauchbeschichtung vorgenommen.

Diese bevorzugten Verstärkungen sind also je einzeln mit zwei zusätzlichen Schichten überzogen. Die untere, direkt auf der Faser aufgetragene Schicht ist aus Pyrokohlenstoff. Auf diese Schicht ist eine an sich bekannte Tauchbeschichtung aus einem pyrolysierbaren Bindemittel aufgebracht. Bei der Infiltration des porösen Formkörpers mit flüssigem Silizium wirkt die aus der Harzbeschichtung hervorgegangene Kohlenstoffschicht als "Opferschicht". Das flüssige Silizium reagiert mit dieser äußersten Schicht zu Siliziumcarbid. Dieses stellt eine Diffusionsbarriere für das flüssige Silizium dar, welches somit nicht weiter in die Faser eindringen kann. Die tiefer gelegene Schicht aus Pyrokohlenstoff und die Verstärkungsfasern im Kern werden nicht angegriffen.

Die so behandelten Fasern zeichnen sich durch besonders hohe Festigkeit aus. Die zusätzliche Schicht aus Pyrokohlenstoff bewirkt auch eine optimale Anbindung der Verstärkungsfasern an die Matrix. Sie wirken rißumleitend und sind längsbeweglich gleitend, was die guten Ergebnisse der Festigkeits- und Dreipunktbiegeversuche bewirkt. Faser-Pul-out-Effekte sind möglich.

Durch die Beschichtung dieser Verstärkungsfasern bei der Herstellung des erfindungsgemäßen Faserverbundwerkstoffs, auch in geringen Anteilen am Gesamtfaservolumen, lassen sich die Werte für Festigkeit und Dehnung, wie sie zum Beispiel im Dreipunkt-Biegetest nachgewiesen werden können, deutlich steigern. Die übrigen Parameter werden dadurch nicht beeinträchtigt.

Durch die Beschichtung der PyC-Fasern mit einer Harzlösung erhält man die Möglichkeit, diese Fasern auch für silizierte Werkstoffe zu verwenden.

Das Verfahren zur Herstellung dieser Verstärkungsfasern zeichnet sich dadurch aus, daß Kohlenstoff-Fasern zunächst mit pyrolytischem Kohlenstoff beschichtet werden. Darunter werden hier sowohl pyrolysierte Tauchbeschichtungen wie z. B. Pech als auch aus der Gasphase abgeschiedene Schichten verstanden. Die Fasern werden anschließend mit pyrolysierbarem Kunststoffmaterial versehen.

Die Beschichtung mit pyrolytischem Kohlenstoff kann einmal durch Tauchbeschichtung, z. B. Eintauchen in ein Pechbad erfolgen. Dieses Verfahren eignet sich insbesondere für Langfasern. Zum anderen kann auf die Fasern eine CVD-Beschichtung, z. B. mit Methan in einem Reaktor, aufgetragen werden. Dieses Verfahren ist sowohl für Langfasern als auch für Kurzfasern gut geeignet.

Die Verwendung von Pech hat den Vorteil, daß als Pyrokohlenstoffschicht kristalliner Kohlenstoff entsteht, der wesentlich langsamer mit flüssigem Silizium reagiert als eine Schicht aus amorphem Kohlenstoff, wie sie bei der Verwendung z. B. eines Phenolharzes entsteht. Dadurch wird die Diffusionsbarriere für den amorphen Kohlenstoff noch verstärkt.

Langfasern werden vorzugsweise nach der Beschichtung und vor der Verarbeitung zu einem Grünkörper verschnitten.

Es können behandelte Einzelfasern oder Faserbündel verwendet werden. Diese Faserbündel bestehen vorzugsweise aus etwa 1.000 bis 14.000 Einzelfasern mit mittleren Durchmessern von etwa 5 bis 10 µm und einer Länge von etwa 1 bis 30 mm. Auf diese Weise können auch kommerziell erhältliche Faserbündel verwendet werden. Dies ermöglicht eine kostengünstige Herstellung.

Für den erfindungsgemäßen Gradientenwerkstoff bedeutet dies, daß in den nacheinander in die Preßform geschichteten Preßmassen Verstärkungsfasern enthalten sind, bei denen die Qualität der Faserbeschichtung von außen nach innen gesteigert wird. Im Kern einer späteren Brems Scheibe finden beispielsweise PyC-beschichtete Kohlenstoff-Fasern Verwendung, wodurch ein schadenstolerantes Verhalten für

das gesamte Bauteil gewährleistet ist. Die weitere Befüllung geschieht mit Preßmassen, die Fasern mit abnehmender Beschichtungsqualität enthalten, bis wiederum für die Reibschicht nur noch schwach beschichtete Fasern – im Extremfall unbeschichtete Fasern – zum Einsatz kommen. Die äußerste Schicht, die dann als eigentliche Reibschicht dient, kann also überwiegend oder sogar vollständig aus Siliziumcarbid bestehen, weil die schwach oder gar nicht beschichteten Fasern während der Flüssigsilizierung überwiegend oder vollständig zu Siliziumcarbid konvertiert werden.

Weiterhin ist es möglich, den Gradienten in mechanischen und tribologischen Eigenschaften nicht allein über die Faserbeschichtung zu erreichen, sondern sowohl Faserqualität als auch Faserlänge zu variieren.

Die Verwendung von Kurzfasern hat den weiteren Vorteil, daß durch den Befüllungs- und Preßvorgang auch Fasern senkrecht zur Preßebene orientiert werden und somit einen kontinuierlichen Übergang der Eigenschaften gewährleisten.

Zur Herstellung des erfindungsgemäßen Werkstoffs können alle gängigen Verstärkungsfasern verwendet werden. Bevorzugt werden Kohlenstoff-Fasern. Aber auch andere hochwärmefeste Fasern, wie Siliziumcarbid-Fasern oder Fasern auf der Basis von Si/C/B/N sind grundsätzlich geeignet. Ferner sind Glas- oder Metallfasern, z. B. auf der Basis von Titan geeignet. Gut geeignet sind auch Aramidfasern.

Diese verschiedenen Variablen ermöglichen in Kombination eine definierte Änderung der Werkstoffeigenschaften über die Dicke der Scheibe.

Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden im folgenden anhand der beigelegten Zeichnungen näher beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Querschnitts über eine PyC-beschichtete Kohlenstoff-Faser;

Fig. 2 einen schematischen Querschnitt durch einen erfindungsgemäßen Gradientenwerkstoff;

Fig. 3 eine Abbildung einer nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Brems Scheibe im CFK-Zustand (Grünkörper);

Fig. 4, 5 Schliffbilder des Gradientenaufbaus der Brems Scheibe aus Fig. 3.

Die in Fig. 1 dargestellte Verstärkungsfaser 1 weist einen inneren Kern 2 aus einer Kohlenstofffaser auf. Dieser Kern 2 ist mit einer Beschichtung 3 aus Pyrokohlenstoff versehen. Die Beschichtung 3 ist vorzugsweise etwa 100–300 nm dick. Ein bevorzugter Pyrokohlenstoff. Auf der Beschichtung 3 ist eine äußere Schicht 4 aus einem pyrolysierbaren Bindemittel aufgebracht. Die Schicht 4 ist vorzugsweise etwa 200–800 nm dick. Dieses Bindemittel ist beispielsweise ein pyrolysierbares Harz oder Harzgemisch, vorzugsweise aus der Gruppe der Phenolharze. Die Schicht 4 wird bei der späteren Pyrolyse in Kohlenstoff umgewandelt, der wiederum bei der Infiltration mit flüssigem Silizium zu Siliziumcarbid reagiert. Der innere Bereich der Verstärkungsfaser 1, nämlich die Beschichtung 3 aus Pyrokohlenstoff und der von der Beschichtung 3 umhüllte Kern 2 der Verstärkungsfaser 1 werden vom flüssigen Silizium nicht angegriffen.

Diese Fasern sind auf verschiedene Weise herstellbar. Ein mögliches Verfahren eignet sich gut zur Beschichtung von Langfasern. Die Langfasern werden zunächst in ein Pechbad eingetaucht und anschließend in einer Trocknungsstation getrocknet. Die derart beschichteten Fasern werden schließlich in ein Bad aus einem pyrolysierbaren Phenolharz eingetaucht. Nachdem Durchlaufen einer weiteren Trocknungsstation sind die Langfasern einsatzbereit und können z. B. auf die gewünschte Länge geschnitten werden.

Ein weiteres mögliches Verfahren ist sowohl zur Be-

schichtung von Kurzfasern als auch zur Beschichtung von Langfasern geeignet. Die Fasern werden zunächst einer CVD-Beschichtung, zum Beispiel mit Methan, und anschließend einer Tauchbeschichtung in einem Bad aus pyrolysierbarem Phenolharz unterzogen.

Das Herstellungsverfahren für den erfindungsgemäßen Werkstoff ist an sich bekannt und z. Bsp. in der deutschen Patentanmeldung 197 11 829.1 beschrieben.

Die Mischung zur Herstellung der Grünkörper besteht aus Fasern oder Faserbündeln, einem pyrolysierbaren Bindemittel, z. B. einem Phenolharz, und ggf. kohlenstoffhaltigen Füllmitteln wie Graphit oder Ruß sowie weiteren Füllmitteln wie Silizium, Carbiden, Nitriden oder Boriden, vorzugsweise Siliziumcarbid, Titancarbid oder Titanborid in Pulverform. Weitere bevorzugte Füllmittel zur Beeinflussung der Pyrolysekinetik, insbesondere zur Beschleunigung der Pyrolyse, sind z. Bsp. Polyvinylalkohol oder Methylcellulose. Ferner können der Mischung Zusätze von Eisen, Chrom, Titan, Molybdän, Nickel oder Aluminium zugegeben werden. Diese Zusätze verbessern das Verhalten des flüssigen Siliziums bei der Infiltration.

Die Bäcker können auch bereits mit Füllstoffen wie z. B. Graphit versetzt sein.

Die kohlenstoffhaltigen Füllmittel unterstützen den Zusammenhalt bei der Herstellung und anschließenden Pyrolyse des Grünkörpers und beschleunigen die Pyrolyse. Die weiteren Füllmittel dienen zur Einstellung der Verschleißfestigkeit der späteren Verbundkeramik.

Der Grünkörper kann durch Trocken- oder Warmfließpressen eines Granulats hergestellt werden. Das Granulat kann durch Aufbaugranulation der oben aufgezählten Komponenten erhalten werden. Das Granulat wird nach der Herstellung getrocknet und zu einem Grünkörper verpreßt. Dabei ist eine endformnahe Fertigung des Grünlings möglich. Da bei der Pyrolyse und Infiltration mit flüssigem Silizium wenig Schwindung auftritt, ist der Aufwand für die Nachbearbeitung gering.

Die oben beschriebene Mischung kann aber auch mit thermisch aushärtbaren Bindemitteln in einem Knetter gemischt, in einer Form gepreßt und unter Erwärmen zu einem Grünkörper ausgehärtet werden. Dabei kann der Grünkörper oder der aus der Pyrolyse des Grünkörpers resultierende poröse Formkörper auf eine gewünschte Form nachgearbeitet werden.

Die Porosität des Formkörpers läßt sich durch die Wahl der Zuschlagstoffe und ihre Menge einstellen.

#### Ausführungsbeispiel 1

Aus 6 mm langen Kurzfasern SCF6 und 3 mm langen Kurzfasern SCF3 der Firma SGL, Phenolharz, Titancarbid und Graphitfüllstoff wurden drei verschiedene Preßmassen hergestellt.

Preßmasse 1 enthielt 3 mm-Fasern mit ausschließlich kommerzieller Epoxidharzschlichte. Preßmasse 2 enthielt 6 mm-Fasern, die durch Tränken in einer Pechlösung (Carbores, Fa. Rüttgers) und anschließendes Trocknen beschichtet wurden. Die beschichteten Fasern wurden dann durch Tauchen in eine stark verdünnte Phenolharzlösung und anschließendes Trocknen in einem Umluftschrank bei 130°C imprägniert. Preßmasse 3 enthielt eine Mischung aus 3 mm- und 6 mm-Fasern im Verhältnis 1 : 2, die wie soeben beschrieben zunächst in die oben genannte Pechlösung, dann in eine konzentrierte Phenolharzlösung getaucht wurden. Danach erfolgte ebenfalls jeweils ein Trocknungs- und Aushärteschritt.

Aus den verschiedenen beschichteten Fasern stellte man nach bekanntem Verfahren die drei Preßmassen her. Dazu

wurden unbehandelte bzw. behandelte Fasern mit Phenolharz, Titancarbid und Graphit als Füllstoff in einem Mischknetter zu einer Preßmasse verknetet. Der Faservolumenanteil betrug 38%.

Mit diesen Preßmassen wurde eine Bremsscheibe hergestellt. Dazu wurde die endformnahe Matrize einer Warmpresse befüllt. Die Befüllung erfolgte in fünf Schritten ohne Vorverdichten. Zunächst befüllte man mit Preßmasse 1; die Höhe der Schicht betrug ca. 13 mm. Es folgte eine zweite Schicht aus Preßmasse 2 mit einer Füllhöhe von etwa 10 mm; eine dritte Schicht aus Preßmasse 3 mit einer Füllhöhe von etwa 20 mm; eine vierte Schicht aus Preßmasse 2 mit einer Füllhöhe von etwa 10 mm und eine fünfte und letzte Schicht aus Preßmasse 1 mit einer Füllhöhe von etwa 13 mm. Diese Schichtung wurde mit etwa 80 Bar verpreßt. Das Ergebnis war eine Scheibe von ca. 25 mm Dicke.

Diese Preßmasse wurde bei etwa 150°C zu einer formstabilen CFK-Scheibe ausgehärtet, wie sie in Fig. 3 dargestellt ist. Die Pyrolyse fand bei 800°C in einem Pyrolyseofen unter Schutzgas statt. Die anschließende Infiltration mit flüssigem Silizium wurde unter Vakuum bei etwa 1600°C mit einer flüssigen Siliziumschmelze durchgeführt. Der resultierende C/SiC-Körper wurde auf Raumtemperatur heruntergekühlt.

Die resultierende Bremsscheibe wurde mit Bremsbelägen aus demselben Material, jedoch mit einem geringeren Siliziumanteil, getestet. Die Reibwerte lagen bei sehr guten 0,55-0,6.

Die Biegefestigkeitswerte wurden für die einzelnen Schichten separat ermittelt. Die Dreipunktbiegefestigkeit des Materials aus der Preßmasse 1 betrug etwa 170 MPa bei einer Dehnung von 0,12%. Die Dreipunktbiegefestigkeit des Materials aus der Preßmasse 2 betrug etwa 91 MPa bei einer Dehnung von 0,0900. Die Dreipunktbiegefestigkeit des Materials aus der Preßmasse 3 schließlich betrug ca. 67 MPa bei einer Dehnung von 0,21%.

#### Ausführungsbeispiel 2

Es wurden gleiche Anteile von 3 mm langen Kurzfasern SCF3 und 6 mm langen Kurzfasern SCF6 der Firma SGL sowie T 800/6K Fasern der Firma Toray von 24 mm Länge verwendet. Die 3 mm- und 6 mm-Fasern wurden wie oben beschrieben zunächst mit einer Schicht aus Pyrokohlenstoff und dann mit einer Schicht aus Phenolharz versehen. Die 24 mm-Fasern besaßen eine über einen CVD-Prozeß mittels Methan aufgebraute Pyrokohlenstoffschicht (PyC) und eine Harzbeschichtung, die durch Tauchen aufgebracht wurde.

Die so behandelten Fasern wurden wie oben beschrieben zu einer Preßmasse verarbeitet. Der Anteil der erfindungsgemäß beschichteten Fasern betrug wiederum 38%. Diese Fasern wurden mit Phenolharz, Titancarbid und Graphit als Füllstoff in einem Mischknetter zu einer Preßmasse verknetet.

Es wurden wie oben beschrieben drei verschiedene Preßmassen hergestellt, wobei die Preßmassen 1 und 2 wie oben beschrieben zusammengesetzt waren und die Preßmasse 3 eine Mischung aus 24 mm- und 6 mm-Fasern im Verhältnis 1 : 2 enthielt.

Die Befüllung der endformnahen Matrize der Warmpresse erfolgte in fünf Schritten ohne Vorverdichten wie oben beschrieben, wobei die Füllhöhe für die Schichten aus der Preßmasse 1 jeweils etwa 10 mm und für die Schichten aus der Preßmasse 2 jeweils etwa 12 mm betrug. Die Schichtung wurde mit 80 Bar verpreßt. Daraus ergab sich eine Scheibe von ca. 25 mm Dicke.

Die Preßmasse wurde bei etwa 150°C zu einer formstabi-

len CFK-Scheibe ausgehärtet. Die Pyrolyse fand bei 800°C in einem Pyrolyseofen unter Schutzgas statt. Die anschließende Silizierung wurde unter Vakuum bei etwa 1600°C mit einer flüssigen Siliziumschmelze durchgeführt. Der resultierende C/SiC-Körper wurde auf Raumtemperatur heruntergekühlt.

Die Reibwerte, die wie oben beschrieben gemessen wurden, betrugen ebenfalls 0,55–0,6. Die Dreipunktbiegefestigkeit des Materials aus der Preßmasse 2 (dicke Harzbeschichtung) betrug ca. 67 MPa bei einer Dehnung von 0,21%. Die Dreipunktbiegefestigkeit von Material aus Preßmasse 3 (PyC/Harzbeschichtung) betrug etwa 107 MPa bei einer Dehnung von 0,42%.

Fig. 2 zeigt schematisch eine nach diesem Verfahren hergestellte Bremscheibe 10 im Querschnitt. Die zentrale Öffnung der Bremscheibe ist mit 11 und das eigentliche Scheibenmaterial mit 12 bezeichnet. Die Bremscheibe 10 besteht aus dem erfindungsgemäßen Gradientenwerkstoff 12. Die äußersten Bereiche 13a, 13b an der Oberfläche der Bremscheibe 10 bilden die Reibflächen. Sie bestehen aus verschleißresistenter widerstandsfähiger keramischer Substanz. Der zentrale Bereich 15 im Inneren der Bremscheibe 10 bildet einen schadenstoleranten Kern. Er besteht aus einem kohlenstoffhaltigen Material mit wenig ausgeprägten keramischen Eigenschaften, dem insbesondere die für keramische Werkstoffe typische Sprödigkeit fehlt. Die Bereiche 14a und 14b bilden Zwischenbereiche, deren Material nicht so ausgeprägt keramisch wie das der äußeren Bereiche 13a, 13b ist, aber auch nicht so kohlenstoffhaltig wie das Material des zentralen Bereichs 15 ist.

Die Phasengrenzen 16a, 16b, 16c und 16d zwischen den einzelnen Bereichen 13a, 13b, 14a, 14b, 15 sind nicht scharf ausgeprägt, sondern eher fließend. Vorzugsweise gehen sie ineinander über. Das erfindungsgemäße Verfahren gewährleistet einen allmählichen Übergang und somit einen guten Zusammenhalt zwischen den Bereichen. Zusätzliche Fügeverfahren sind nicht notwendig.

Fig. 3 zeigt eine nach dem Ausführungsbeispiel 1 hergestellte Bremscheibe im CFK-Zustand, also nach dem Pressen, aber vor dem Pyrolysieren des Grünkörpers und vor der Infiltration mit flüssigem Silizium.

Die Fig. 4 und 5 zeigen Schliffbilder des Gradientenaufbaus des in den Fig. 2 und 3 gezeigten porösen Formkörpers. Die verschiedenen Schichten, die nahtlos ineinander übergehen, sind gut zu erkennen.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen eines Faserverbundwerkstoffs mit hochwarmfesten Fasern insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff, Silizium, Bor und/oder Stickstoff, wobei aus Fasern, Bindemittel und gegebenenfalls Füllstoffen und/oder Zuschlagstoffen eine Preßmasse hergestellt wird, die in einer Preßform zu einem Grünkörper verpreßt wird, dadurch gekennzeichnet, daß verschiedene Preßmassen hergestellt werden, die Fasern mit unterschiedlicher Qualität und/oder in unterschiedlichen Anteilen enthalten, und die Preßform in mehreren Schritten nacheinander mit den verschiedenen Preßmassen befüllt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Preßform ohne Vorverdichten befüllt wird.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß Fasern verwendet werden, die mit einer Schicht aus pyrolysierbarem Bindemittel überzogen worden sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß Fasern verwendet

werden, die mit einer Schicht aus Pyrokohlenstoff und mit einer Schicht aus pyrolysierbarem Bindemittel überzogen worden sind.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die verschiedenen Preßmassen unterschiedlich beschichtete Fasern verwendet werden.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Preßform mit den unterschiedlich beschichteten Fasern derart befüllt wird, daß ein Grünkörper gebildet wird, aus dem ein Faserverbundwerkstoff mit einem im wesentlichen graphitischen Kern und einer im wesentlichen keramischen Oberfläche erhältlich ist.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß für den im wesentlichen graphitischen Kern Fasern mit einer ausgeprägten Beschichtung und für die im wesentlichen keramische Oberfläche Fasern mit einer dünnen Beschichtung und/oder Fasern ohne Beschichtung verwendet werden.

8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß für den im wesentlichen graphitischen Kern Fasern mit einer gegenüber der Matrix wenig reaktiven Beschichtung und für die im wesentlichen keramische Oberfläche Fasern mit einer gegenüber der Matrix reaktiveren Beschichtung verwendet werden.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zur Herstellung der Preßmassen im wesentlichen Kurzfasern oder Kurzfaserbündel verwendet werden.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die verschiedenen Preßmassen Fasern mit unterschiedlicher Länge verwendet werden.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für die verschiedenen Preßmassen Fasern aus einem unterschiedlichen Material verwendet werden.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zum Herstellen der Preßmassen die einzelnen Komponenten zu einem Granulat verarbeitet werden, insbesondere durch Aufbaugranulation und das Granulat getrocknet und zu dem Grünkörper verpreßt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Granulat durch Trocken- oder Warmfließpressen verpreßt wird.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß zum Herstellen der Preßmasse die einzelnen Komponenten in einem Knet器 gemischt werden und die Mischung zu einem Grünkörper verpreßt wird.

15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Preßmasse ein thermisch aushärtbares Bindemittel zugegeben wird und der gepreßte Grünkörper unter Erwärmen ausgehärtet wird.

16. Faserverbundwerkstoff mit hochwarmfesten Fasern insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff, Silizium, Bor und/oder Stickstoff, dadurch gekennzeichnet, daß er durch das Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15 herstellbar ist.

17. Faserverbundwerkstoff mit hochwarmfesten Fasern insbesondere auf der Basis von Kohlenstoff, Silizium, Bor und/oder Stickstoff, dadurch gekennzeichnet, daß er aus mindestens zwei verschiedenen ineinander übergehenden Schichten besteht, die Fasern mit unterschiedlicher Qualität und/oder in unterschiedlichen

Anteilen enthalten.

18. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß er Fasern mit einer Schicht Kohlenstoff und/oder Pyrokohlenstoff enthält.

19. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 17 oder 18, 5  
dadurch gekennzeichnet, daß die verschiedenen Schichten unterschiedlich beschichtete Fasern aufweisen.

20. Faserverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß er einen im wesentlichen graphitischen Kern und eine im wesentlichen keramische Oberfläche aufweist. 10

21. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß der im wesentlichen graphitischen Kern Fasern mit einer ausgeprägten Beschichtung und die im wesentlichen keramische Oberfläche 15  
Fasern mit einer dünnen Beschichtung und/oder Fasern ohne Beschichtung enthält.

22. Faserverbundwerkstoff nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, daß der im wesentlichen graphitischen Kern wenig oder keine mit der Matrix reaktionsgebundene Fasern und die im wesentlichen keramische Oberfläche überwiegend oder ausschließlich mit der Matrix reaktionsgebundene Fasern aufweisen. 20

23. Faserverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 17 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß er im wesentlichen Kurzfasern oder Kurzfaserbündel aufweist. 25

24. Faserverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 17 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die verschiedenen Schichten Fasern mit unterschiedlicher Länge aufweisen. 30

25. Faserverbundwerkstoff nach einem der Ansprüche 17 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die verschiedenen Schichten Fasern aus einem unterschiedlichen Material aufweisen. 35

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

40

45

50

55

60

65

- Leerseite -

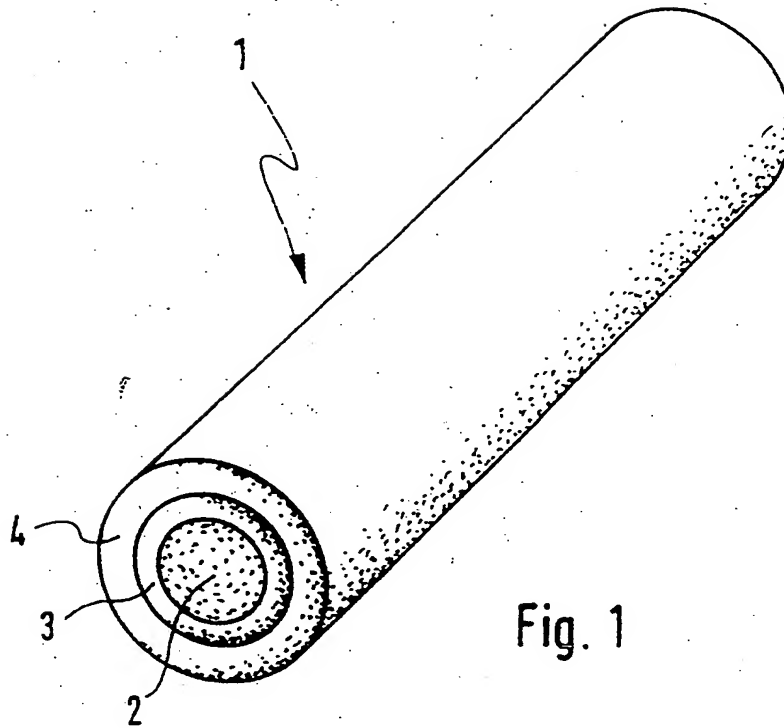


Fig. 1

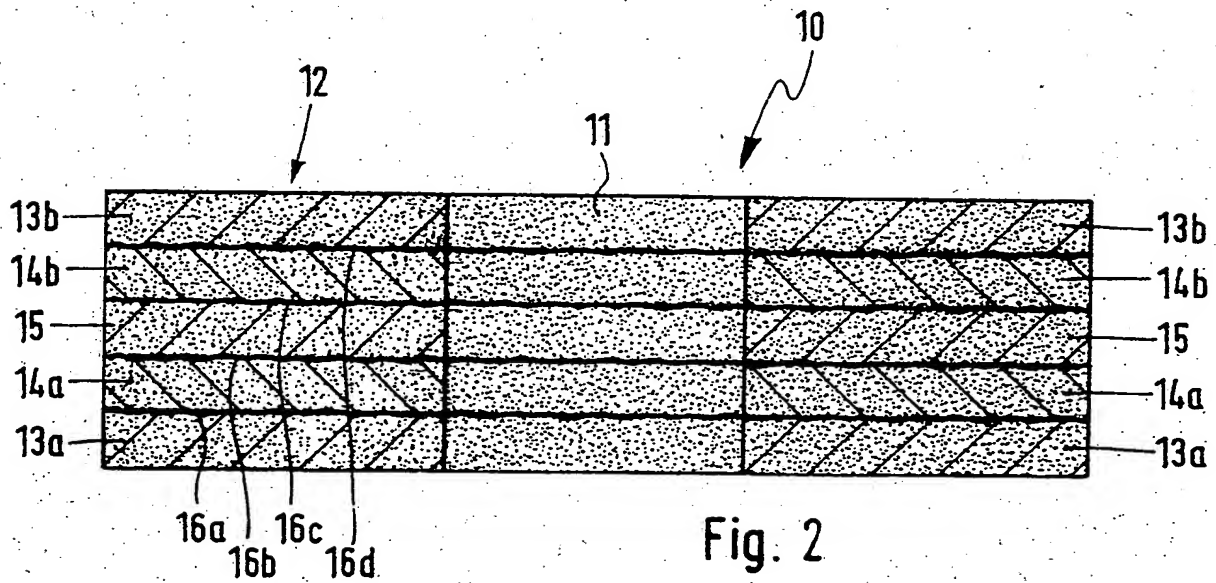
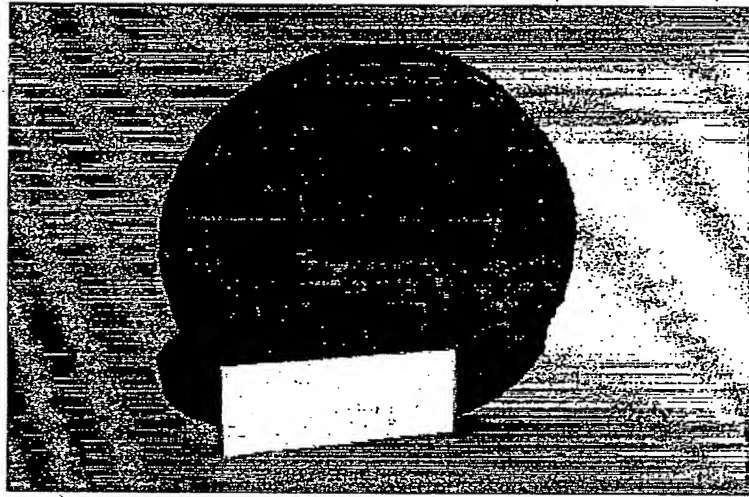


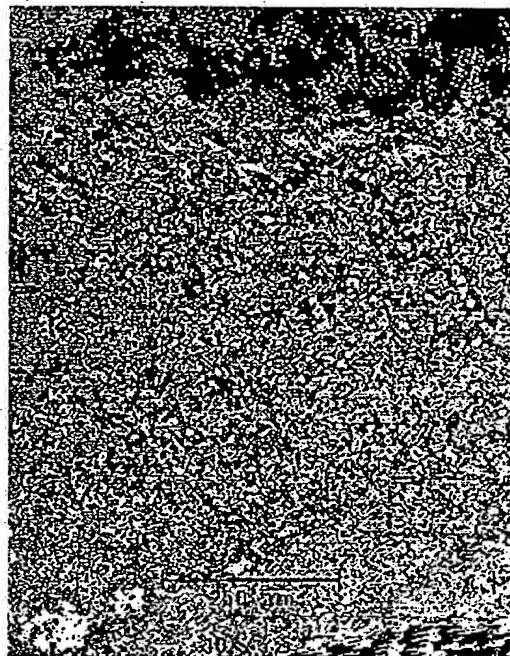
Fig. 2



Figur 3



Figur 4



Figur 5



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**